



TUGAS AKHIR - TE 141599

PEMODELAN DAN ANALISIS TRANSFORMATOR DENGAN BEBAN NON LINIER

Rishfa Qurotaayun
NRP 2212105052

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

***MODELING AND ANALYSIS OF TRANSFORMER WITH NON
LINIER LOAD***

Rishfa Qurotaayun
NRP 2212105052

Consultative Lecturer
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015***

PEMODELAN DAN ANALISIS TRANSFORMATOR DENGAN BEBAN NON LINIER

TUGAS AKHIR

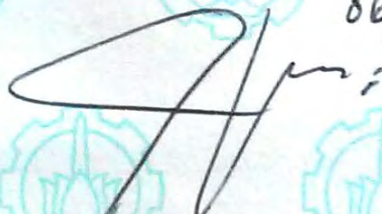
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

06/07/15



Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD
NIP. 197311192000031001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Soedibyo, M.MT
NIP. 195512071980031004



PEMODELAN DAN ANALISIS TRANSFORMATOR DENGAN BEBAN NON LINIER

Nama Mahasiswa : Rishfa Qurotaayun
NRP : 2212105052
Dosen Pembimbing 1 : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRAK

Perkembangan teknologi sudah semakin canggih dan penggunaan peralatan elektronika pun semakin banyak. Sebagian besar peralatan elektronika berupa beban non liner. Beban non linier tersebut merupakan salah satu penyebab utama penghasil harmonisa sehingga dapat mempengaruhi kualitas daya. Dampak harmonisa dapat terjadi pada sebuah transformator. Dampak tersebut perlu mendapatkan perhatian khusus karena transformator merupakan salah satu peralatan sistem tenaga yang paling penting. Masalah yang ditimbulkan berupa meningkatnya rugi-rugi transformator, overheating dan faktor kerja yang rendah sehingga menyebabkan biaya operasi yang tinggi dan keandalan sistem yang rendah.

Pada Tugas akhir ini dilakukan eksperimen terhadap transformator yang mengandung harmonisa dan akan dilakukan analisis berdasarkan pemodelan transformator. Sehingga dari eksperimen serta analisis dapat mengetahui rugi-rugi pada transformator dan mengetahui kapasitas transformator sebenarnya.

Hal tersebut terbukti secara eksperimen dan analisis berdasarkan pemodelan transformator bahwa rating transformator 100VA akan mengalami penurunan (*derating* trafo) menjadi 88.2VA. Hal tersebut terjadi akibat dari rugi-rugi yang meningkat sebab adanya beban non linier yaitu pengaruh komponen harmonisa.

Kata kunci : harmonisa; beban non linier; *derating* transformator; transformator.

MODELING AND ANALYSIS OF TRANSFORMER WITH NON LINIER LOAD

Name of Student : Rishfa Qurotaayun
NRP : 2212105052
Consultative Lecturer 1 : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD
Consultative Lecturer 2 : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT

ABSTRACT

The development of increasingly sophisticated technology and the use of electronic equipment even more. Most of the electronic equipment in the form of non-linear loads. Non-linear load is one of the main causes of producing harmonics that can affect the quality of power. Impact of harmonics can occur in a transformer. These impacts need special attention because transformator is one of the power system equipment are the most important. Problems caused by increasing the transformer losses, overheating and low work factor leading to high operating costs and low system reliability.

At the end of the task is performed experiments on transformers containing harmonics and analysis will be done by modeling the transformer. So of experimentation and analysis can determine losses in the transformer and the transformer capacity to know the truth.

This is proven by experiments and analysis based modeling 100VA transformer transformer that rating will decline (transformer derating) into 88.2VA. This happens as a result of increased losses because the non-linear load is the influence of harmonic components.

Keywords: harmonics; non-linear load; transformer derating; transformer.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

“Pemodelan Dan Analisis Dan Transformator Dengan Beban Non Linier”

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. **ALLAH SWT.**, Maha Pemberi Ilmu dan Kasih Sayang-Nya terhadap hamba-Nya atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Shalawat dan salam tetap tucurahkan kepada **Nabi Muhammad SAW.**, motivator sepanjang masa yang patut dijadikan tauladan.
3. Orang tua tercinta (Ibu dan Ayah) dan seluruh keluarga besar yang selalu memberi bantuan baik doa dan materi.
4. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
5. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng, PhD dan Bapak Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam Tugas Akhir ini.
6. Seluruh staf pengajar jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak membantu kami.
7. Seluruh asisten lab. Konversi Energi Listrik jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak membantu kami.
8. Seluruh asisten lab. Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak membantu kami.
9. Teman-teman yang selalu memberikan dukungan semangat Rama Afrian Syah, Elysha Budi Utami dan teman – teman yang lain yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.
10. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan di masa yang akan datang. Sekian kata pengantar dari kami, terimakasih.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

TABLE OF CONTENTS

COVER

AUTHENTICITY

APPROVAL SHEET

ABSTRACT.....	i
ABSTRACT.....	ii
FOREWORD.....	iii
TABLE OF CONTENTS.....	v
ILLUSTRATION	vii
TABLES	ix

CHAPTER 1 PREFACE

1.1	Background.....	1
1.2	Purpose.....	1
1.3	Problem	2
1.4	Methodology.....	2
1.5	Systematic of Discussion.....	3
1.6	Relevance.....	4
1.7	Literature Review.....	4

CHAPTER 2 MODELING OF TRANSFORMER

2.1	Transformer	7
2.1.1	Ideal Transformer.....	8
2.1.2	Transformer Without Load	8
2.1.3	Current Amplifier.....	9
2.1.4	Transformer With Load	13
2.1.5	Rangkaian Ekivalen Transformator.....	14
2.1.6	Transformer Losses.....	17
	2.1.6.1 Chopper Losses	18
	2.1.6.2 Hysteresis Losses	19
	2.1.6.3 Eddy Current Losses.....	20
2.2	Linier Load and Non Linier Load	20
2.3	Harmonic	22
	2.3.1 Standart of Harmonic	23
	2.3.2 Effects of Harmonisa.....	25
2.4	Model of Transformer	29

CHAPTER 3 CHARACTERISTICS OF LINIER LOAD AND NON LINIER LOAD

3.1.	Block of System Diagram.....	33
3.2.	Experiment	33
3.2.1	Open Circuit Test.....	34
3.2.2	Short Circuit Test.....	36
3.2.3	Transformer With Load Test	38
3.2.4	Resistances Test.....	39
3.2.5	Harmonics Current Test.....	40
3.3.	Characteristics of linier and non linier load.....	41

CHAPTER 4 ANALYSIS

4.1	Transformer With Linier Load	49
4.1.1	Calculation.....	49
4.1.2	Experimen	49
4.2	Transformer With Non Linier Load.....	50
4.2.1	Calculation.....	50
4.2.2	Experimen	56
4.3	Derating transformer.....	57
4.3.1	Calculation.....	57
4.3.2	Experimen	58
4.3.3	Comparative Analysis	58

CHAPTER 5 CLOSING

5.1	Conclusions.....	61
5.2	Suggestions.....	61

BIBLIOGRAPHY	63
---------------------------	-----------

BIOGRAPHY	64
------------------------	-----------

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Standar harmonisa arus.....	25
Tabel 2.2 Standar Harmonisa Tegangan	25
Tabel 3.1 Pengujian open circuit	35
Tabel 3.2 Pengujian short circuit	37
Tabel 3.3 Pengujian tahanan awal (Rdc) sisi input transformator.....	39
Tabel 3.4 Pengujian tahanan awal (Rdc) sisi output transformator.....	40
Tabel 3.5 Pengujian arus harmonisa ganjil di sisi primer transformator	46
Tabel 3.6 Pengujian arus harmonisa ganjil di sisi primer transformator	46
Tabel 3.7 Nilai magnitude (I_h/I_1) arus harmonisa ke-n (ganjil).....	47
Tabel 4.1 Pengujian transformator dengan beban linier.....	50
Tabel 4.2 Jumlah keseluruhan nilai harmonisa di sisi input	51
Tabel 4.3 Jumlah keseluruhan nilai harmonisa di sisi output	51
Tabel 4.4 <i>Factor harmonic eddy current losses</i>	52
Tabel 4.5 <i>Factor harmonic other stray losses</i>	53
Tabel 4.6 Rugi-rugi pada beban 25watt	53
Tabel 4.7 Rugi-rugi pada beban 50watt	54
Tabel 4.8 Rugi-rugi pada beban 75watt	54
Tabel 4.9 Rugi-rugi pada beban 100watt.....	55
Tabel 4.10 Pengujian transformator dengan beban non linier	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 1.1 Blok diagram sistem.....	2
Gambar 2.1 Bentuk transformator	7
Gambar 2.2 Konstruksi dasar transformator	8
Gambar 2.3 Prinsip kerja transformator	8
Gambar 2.4 Kurva loop histeresis	10
Gambar 2.5 Transformator tanpa beban	11
Gambar 2.6 Arus penguat dan arus pemagnetan.....	13
Gambar 2.7 Transformator dalam keadaan berbeban.....	13
Gambar 2.8 Rangkaian ekivalensi transformator.....	16
Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen transformer dilihat dari sisi primer...17	
Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen transformer dilihat dari sisi sekunder.....	17
Gambar 2.11 Gelombang beban linier	21
Gambar 2.12 Gelombang beban non linier.....	22
Gambar 2.13 Konstruksi dasar transformator.....	29
Gambar 2.14 Model rangkaian ekivalen transformator.....	32
Gambar 3.1 Blok diagram tahap pelaksanaan Tugas Akhir.....	33
Gambar 3.2 Rangkaian tes hubung terbuka (<i>open circuit</i>)	35
Gambar 3.3 Rangkaian tes hubung singkat (<i>short circuit</i>)	37
Gambar 3.4 Rangkaian pengujian transformator berbeban (beban linier)	38
Gambar 3.5 Rangkaian pengujian transformator berbeban (beban non linier)	39
Gambar 3.6 Rangkaian pengujian tahanan kumparan	39
Gambar 3.7 Alat Ukur <i>Power Quality Analyzer</i>	40
Gambar 3.8 Alat Ukur Osiloskop	41
Gambar 3.9 Gelombang arus dan tegangan beban 50watt.....	41
Gambar 3.10 Gelombang arus dan tegangan beban 75watt.....	42
Gambar 3.11 Gelombang arus dan tegangan beban 100watt.....	42
Gambar 3.12 Gelombang arus dan tegangan beban 50watt.....	43
Gambar 3.13 Gelombang arus, tegangan dan daya beban 75watt.....	43
Gambar 3.14 Gelombang arus dan tegangan beban 100watt.....	44
Gambar 3.15 Spektrum arus harmonisa beban 50watt	44
Gambar 3.16 Spektrum arus harmonisa beban 75watt	45

Gambar 3.17 Spektrum arus harmonisa beban 100watt.....	45
Gambar 4.1 Prinsip rugi-rugi transformator.....	50
Gambar 4.2 Kurva perbandingan beban linier dengan beban non linier berdasarkan perhitungan.....	57
Gambar 4.3 Kurva perbandingan beban linier dengan beban non linier berdasarkan eksperimen	57
Gambar 4.4 Kurva perbandingan antara hasil perhitungan dengan eksperimen.....	58

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Nama : Rishfa Qurotaayun
TTL : Ngawi, 26Mei 1991
Jenis Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Alamat Rumah : PerumGriyo wage Asri
bloke-4, Taman, Sidoarjo
No. HP : 085731595571
E-mail : qrishv@gmail.com
Hobi : melukis, menggambar dan
travelling

RIWAYAT PENDIDIKAN

- 1997 – 2003 : SD Negeri 1 Pepelegi
- 2003 – 2006 : SMP Negeri 2 Sidoarjo
- 2006 – 2009 : SMA Negeri 2 Sidoarjo
- 2009 – 2012 : PENS-ITS D3Elektro Industri
- 2012 – 2015 : Bidang Studi Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro-Lintas Jalur, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

PENGALAMAN KERJA

- Kerja Praktek di PT. Petrokimia Gresik, Bagian Instrumentasi, Juli 2011.
- Kerja Praktek di PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali APP Surabaya, Bagian Sistem Transmisi Tenaga Listrik, Juli 2013.

PENGALAMAN ORGANISASI

- Stafmudadivisi media daninformasi HIMA ELIN 2010-2011.
- Stafmudadivisi media daninformasi HIMA ELIN 2011-2012.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi sudah semakin canggih dan penggunaan peralatan elektronika pun semakin banyak. Sebagian besar peralatan elektronika berupa beban non linier. Beban non linier tersebut merupakan salah satu penyebab utama penghasil harmonisa sehingga dapat mempengaruhi kualitas daya. Dampak harmonisa dapat terjadi pada sebuah transformator. Dampak tersebut perlu mendapatkan perhatian khusus karena transformator merupakan salah satu peralatan sistem tenaga yang paling penting. Masalah yang ditimbulkan berupa meningkatnya rugi-rugi transformator, overheating dan faktor kerja yang rendah sehingga menyebabkan biaya operasi yang tinggi dan keandalan sistem yang rendah.

Pada akhir-akhir ini banyak diteliti pengaruh harmonisa terhadap transformator, khususnya transformator distribusi. Dari penelitian-penelitian sebelumnya juga telah dilakukan usaha untuk mengurangi harmonisa. Reduksi harmonisa menggunakan filter pasif merupakan salah satu usaha yang paling umum digunakan. Mengurangi kapasitas suplai daya transformator (dengan menggunakan perhitungan ketika terjadi derating transformator) sebagai metode sederhana pun dipergunakan untuk mengatasi masalah pada kinerja transformer akibat adanya harmonisa.

Pada tugas akhir ini dibuat pemodelan transformator untuk mempermudah analisis kapasitas transformator akibat/dampak dari harmonisa seperti rugi-rugi transformator yang meningkat akibat naiknya suhu transformator dan tidak menjadikan kinerja transformator berkurang.

1.2 Tujuan

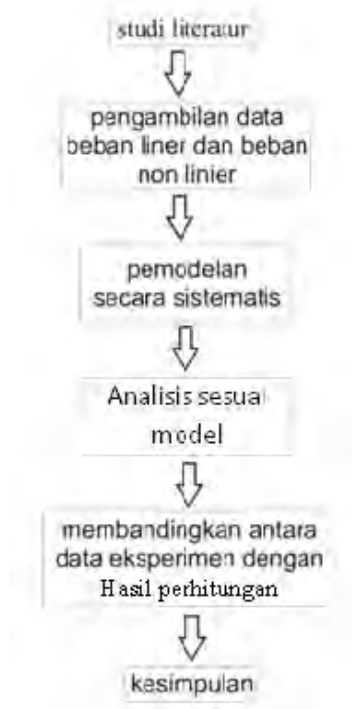
Tujuan dari tugas akhir ini yaitu dapat menganalisa pengaruh harmonisa pada transformator dan pemodelan transformator bila arus yang mengalir mengandung harmonisa. Sehingga dapat bermanfaat dan dapat ikut serta berkontribusi terhadap perkembangan sistem tenaga khususnya pada transformator.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini :
Bagaimana mendapatkan parameter-parameter transformator sebelum dan sesudah pemodelan transformator.

1.4 Metodologi

Pemodelan transformator terhadap beban non linier didasarkan atas studi literatur yang telah dipelajari. Dari Gambar 1.1 blok diagram sistem dapat menentukan *flowchart* rancangan sistem yang menjelaskan bagaimana proses pengerjaan pemodelan tersebut.



Gambar 1.1 Blok diagram sistem

Beberapa langkah yang dibutuhkan untuk pengerjaan proyek akhir ini, diantaranya :

1.4.1 Studi literatur

Studi literature dilakukan dengan mempelajari mengenai pengertian harmonisa, timbulnya harmonisa dan efek/pengaruh harmonisa terhadap transformator serta pemodelan transformator dari berbagai sumber.

1.4.2 Pemodelan

Setelah memahami literatur yang tersedia, maka bisa dimulai dengan membuat pemodelan transformator. Pemodelan transformator berupa model matematis.

1.4.3 Pengambilan data

Setelah pemodelan ditemukan, langkah selanjutnya adalah pengambilan data berupa parameter-parameter trafo.

1.4.4 Perhitungan berdasarkan pemodelan transformator

Pada Tugas Akhir ini, untuk pemodelan transformator akan dilakukan analisis setelah mendapatkan model matematis. Analisis bertujuan untuk mengetahui nilai rugi-rugi pada trafo.

1.4.5 Analisa berdasarkan eksperimen dan hasil perhitungan

Bagian terakhir merupakan analisis sesuai teori pada studi literatur, hasil eksperimen di lapangan dan hasil simulasi yang telah dilakukan.

1.4.6 Pembuatan laporan Tugas Akhir.

Pada tahap ini dilakukan pembuatan atau penulisan laporan Tugas Akhir. Pada laporan tersebut dijelaskan mengenai semua hal yang berkaitan tentang pengerjaan Tugas Akhir. Diharapkan penulisan laporan tersebut dapat bermanfaat sebagai bahan acuan didalam pembuatan alat serupa pada waktu yang akan datang.

1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam pembuatan proyek akhir ini adalah sebagai berikut:

Bab I : Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakan pembuatan proyek akhir, tujuan proyek akhir, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab II : Dasar Teori

Bab ini menjelaskan secara detail teori-teori tentang konsep dasar yang dipergunakan dalam tugas akhir ini, seperti: transformator, harmonisa dan pengaruh yang ditimbulkan harmonisa, dan penurunan rumus/model matematis transformator.

Bab III : Perencanaan dan Pengujian

Pada bab ini berisi perencanaan/desain sistem berdasarkan teori dasar pada Bab 2 serta pengujian sistem yang telah dilakukan.

Bab IV : Analisis

Bab ini membahas secara keseluruhan dari sistem yang telah dibuat pada bab sebelumnya dan dilakukan pengujian pada sistem yang tersebut.

Bab V : Penutup

Bab ini membahas kesimpulan dari pembahasan, perencanaan, pengujian dan analisa berdasarkan data hasil pengujian sistem. Beserta harapan penulis tentang pengembangan dari tugas akhir yang telah dibuat untuk disempurnakan.

1.6 Relevansi

Pemodelan dan analisis transformator dengan beban non linier diangkat pada tugas akhir ini untuk mempermudah pengecekan dan analisis transformator terutama bila diberi beban non linier. Beban non linier yang berupa peralatan-peralatan elektronika tersebut merupakan salah satu penyebab terjadinya gagngguan pada transformator.

1.7 Tinjauan Pustaka

Dalam paper Tugas Akhir *Analisa Pengaruh Harmonisa Terhadap Transformator Distribusi Tegangan Menengah 20kV (Studi Kasus: Transformator Distribusi PT.PLN (PERSERO) AREA JARINGAN SURABAYA BARAT)*^[2], diperkenalkan mengenai pengaruh harmonisa terhadap transformator dan metode perhitungan kapasitas transformator seteleah terkena pengaruh harmonisa guna sebagai

solusi/rekomendasi pembebanan untuk transformator ketika mengalami derating (penurunan kapasitas transformer). Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode *Transformer Harmonic Derating Factor* (THDF) terjadi penurunan kapasitas transformator maksimal sebesar 22.55%. Transformator merupakan peralatan yang paling utama dalam penyaluran daya menuju pusat beban. Akibat penggunaan peralatan elektronika berupa beban non linier semakin banyak, timbul permasalahan kualitas daya pada transformator. Salah satu permasalahan adalah harmonisa. Harmonisa akibat beban non linier dapat menyebabkan distorsi pada tegangan dan arus dimana distorsi tersebut dapat memiliki frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar sistem. Hal tersebut dapat menyebabkan gelombang tegangan dan arus yang dihasilkan menjadi tidak murni sinusoidal murni sehingga menimbulkan gangguan pada peralatan sistem tenaga. Pada umumnya, transformator dirancang sesuai frekuensi kerjanya. Oleh karena itu apabila frekuensi harmonisa lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya.

Pada paper "*Modelling And Simulation Of Distribution Transformer For Analysing The Transformer Losses Using Analytical And Simulation Method*"^[1], diperkenalkan pemodelan transformator menggunakan simulink. Pemodelan transformator tersebut didasarkan pada kerugian yang paling penting adalah kerugian eddy current pada kumparan. Peningkatan rugi arus eddy karena harmonisa meningkatkan suhu transformator dan dapat mengurangi umur (*life time*) transformator.

Dari penelitian sebelumnya yang mengenai analisa pengaruh harmonisa terhadap transformator dengan menggunakan metode THDF, maka dalam tugas akhir ini akan dikembangkan pemodelan transformator akibat adanya arus yang mengandung harmonisa.

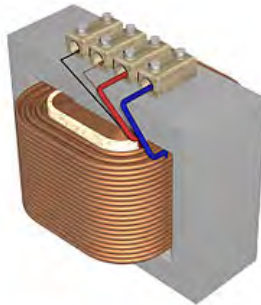
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

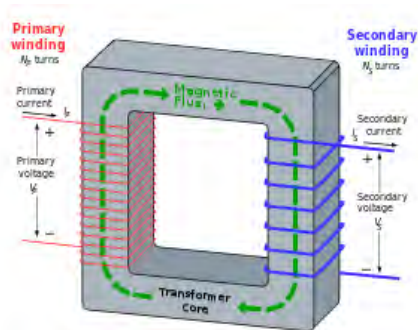
PEMODELAN TRANSFORMATOR

2.1 Transformator

Transformator atau lebih dikenal dengan nama “transformer” atau “trafo” merupakan suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan yang satu ke level tegangan yang lain berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Selain itu, transformator juga dapat digunakan untuk sampling tegangan, sampling arus, dan juga mentransformasi impedansi. Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain mensuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). Bila terdapat lebih dari dua kumparan maka kumparan tersebut akan disebut sebagai kumparan tersier, kuarter, dst. Bentuk dan konstruksi dasar transformator pada gambar 2.1 dan gambar 2.2 dibawah ini.



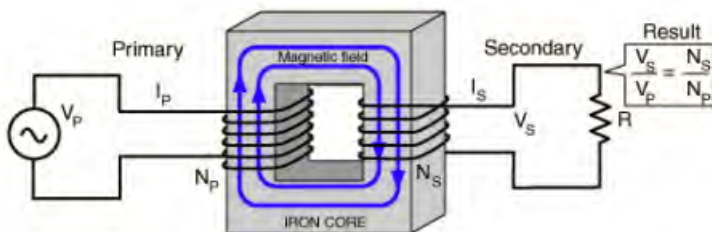
Gambar 2.1 Bentuk transformator



Gambar 2.2 Konstruksi dasar transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, perubahan arus listrik pada kumparan primer menimbulkan perubahan medan magnet. Medan magnet yang berubah diperkuat oleh adanya inti besi. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan, sehingga fluks magnet yang timbulkan akan mengalir ke kumparan sekunder, sehingga pada ujung-ujung kumparan sekunder akan timbul ggl induksi. Efek ini dinamakan induktansi timbal-balik (*mutual inductance*). Bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkain beban) maka akan mengalir arus pada kumparan sekunder. Jika efisiensi sempurna (100%), semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.

2.1.1 Transformator Ideal



Gambar 2.3 Prinsip kerja transformator

Pada transformator ideal, tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator sehingga daya listrik pada kumparan skunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Pada transformator Ideal perbandingan antara tegangan sebanding dengan perbandingan jumlah lilitannya. Dengan demikian dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$P_p = P_s \dots\dots\dots (2.1)$$

$$V_p \times I_p = V_s \times I_s \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

P_p = daya primer (watt)

P_s = daya sekunder (watt)

V_p = tegangan primer (volt)

V_s = tegangan sekunder (volt)

I_p = arus primer (ampere)

I_s = arus sekunder (ampere)

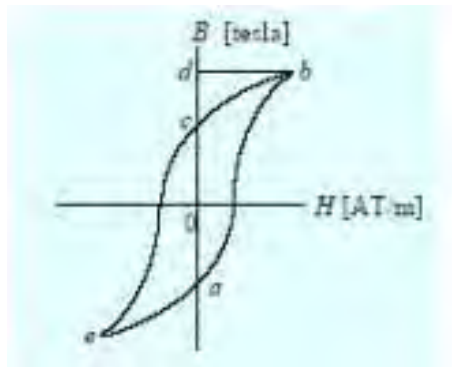
N_p = jumlah lilitan primer

N_s = jumlah lilitan sekunder

Namun, pada kenyataannya tidak ada transformator yang ideal. Hal ini karena pada transformator selalu ada rugi-rugi yang antara lain sebagai berikut:

- a. Rugi-rugi tembaga; rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan yang timbul akibat arus mengalir pada hambatan kawat penghantar yang terdapat pada kumparan primer dan sekunder dari transformator. Rugi-rugi tembaga sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan.

- b. Rugi-rugi arus eddy; rugi-rugi yang disebabkan oleh pemanasan akibat timbulnya arus eddy (pusar) yang terdapat pada inti besi transformator. Rugi-rugi ini terjadi karena inti besi terlalu tebal sehingga terjadi perbedaan tegangan antara sisinya maka mengalir arus yang berputar-putar di sisi tersebut. Rugi-rugi arus eddy sebanding dengan kuadrat tegangan yang disuplai ke transformator.
- c. Rugi-rugi hysteresis; rugi-rugi yang berkaitan dengan penyusunan kembali medan magnetik di dalam inti besi pada setiap setengah siklus, sehingga timbul fluks bolak-balik pada inti besi. Rugi-rugi ini tidak linear dan kompleks, yang dituliskan dalam persamaan:



Gambar 2.4 Kurva loop histerisis

$$P_h = K_h \times f \times B^{1.6} \text{maks (watt)} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

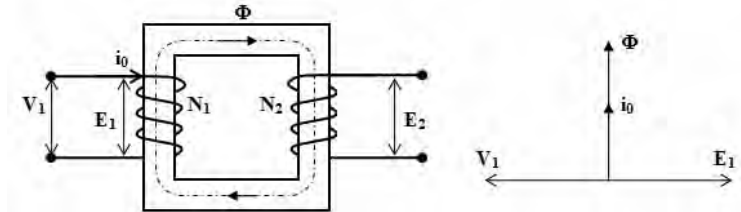
K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)

Fluks Bocor; kebocoran fluks terjadi karena ada beberapa fluks yang tidak menembus inti besi dan hanya melewati salah satu kumparan transformator saja. Fluks yang bocor ini akan menghasilkan induktansi

diri pada lilitan primer dan sekunder sehingga akan berpengaruh terhadap nilai daya yang disuplai dari sisi primer ke sisi sekunder transformator.

2.1.2 Keadaan Transformator Tanpa Beban



Gambar 2.5 Transformator tanpa beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer i_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, i_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (gambar 2.5). Arus primer i_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{\text{maks}} \sin \omega t \dots\dots\dots (2.6)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (Hukum Faraday)

$$e_1 = - N_1 \cdot d \Phi / dt \dots\dots\dots (2.7)$$

$$e_1 = - N_1 \cdot d(\Phi_{\text{maks}} \sin \omega t) / dt = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi) \dots\dots\dots (2.8)$$

harga efektifnya adalah

$$E_1 = N_1 \cdot 2 \pi f \Phi_{\text{maks}} / \sqrt{2} = 4.44 n_1 \cdot f \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Pada rangkaian skunder, fluks (Φ) bersama tadi menimbulkan

$$e_1 = - N_2 \cdot d \Phi / dt \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$e_1 = - N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{maks} \cdot \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 \cdot f \Phi_{maks} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$E_1 / E_2 = N_1 / N_2 \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

$$E_1 / E_2 = V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = a \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

a = perbandingan transformasi

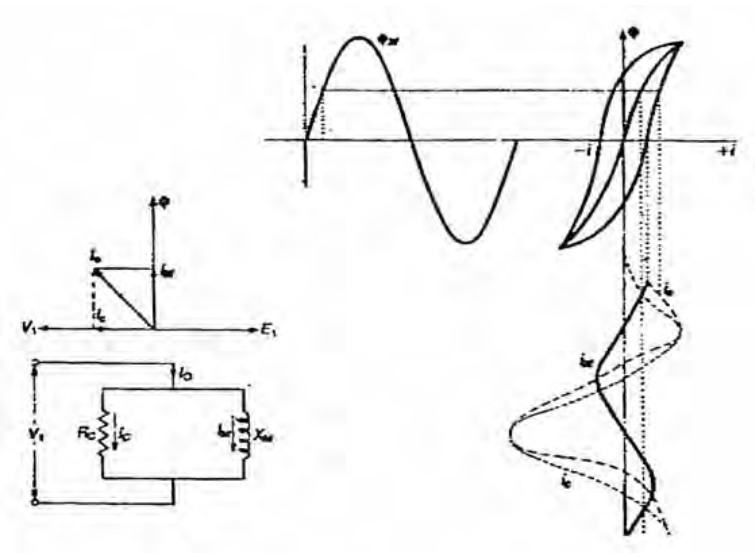
Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai kebesaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 .

2.1.3 Arus Penguat

Arus primer I_o yang mengalir pada saat kumparan sekunder tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_o bukanlah merupakan arus induktif murni, sehingga ia terdiri atas dua komponen (Gambar 2.6)

(1) Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (Φ). Karena sifat besi yang non linear (ingat kurva B-H) , maka arus pemagnetan I_M dan juga fluks (Φ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoid (Gambar 4).

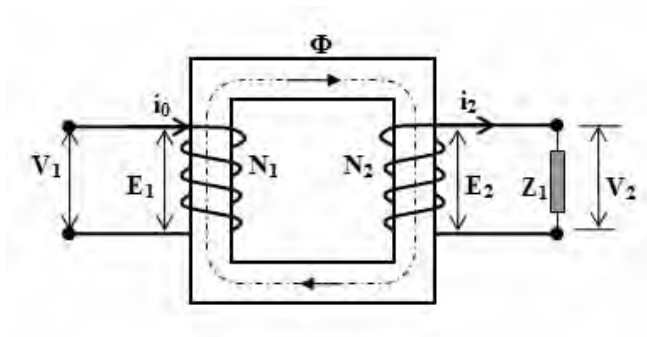
(2) Komponen arus rugi tembaga I_c , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histerisis dan arus 'eddy'. I_c sefasa dengan V_1 , dengan demikian hasil perkalian ($I_c \times V_1$) merupakan daya (watt) yang hilang.



Gambar 2.6 Arus penguat dan arus pemagnetan

2.1.4 Keadaan Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan $\theta_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.7 Transformator dalam keadaan berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I'_2 , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_1 - I'_2) - N_2 I_2 \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\text{Hingga, } N_1 I'_2 = N_2 I_2 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka :

$$I_1 = I'_2 \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\text{Jadi, } N_1/I_1=N_2/I_2 \text{ atau } I_1/I_2=N_2/I_1 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

2.1.5 Rangkaian Ekivalen Transformator

Dalam membuat rangkaian ekivalen transformator, kita harus memperhitungkan semua ketidaksempurnaan (cacat) yang ada pada transformator yang sebenarnya. Setiap cacat utama diperhitungkan dan pengaruhnya dimasukkan dalam membuat model transformator. Effect yang paling mudah untuk dimodelkan adalah rugi-rugi tembaga. Rugi-

ruji tembaga dimodelkan dengan dengan resistor Rp di sisi primer transformator dan resistor Rs di sisi sekunder transformator.

Fluks bocor pada kumparan primer Φ_{LP} menghasilkan tegangan e_{LP} yang diberikan oleh persamaan:

$$e_{LP}(t) = Np \frac{d\phi_{LP}}{dt} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\phi_{LP} = (PN_p)i_p \dots\dots\dots (2.23)$$

Sedangkan Fluks bocor pada kumparan sekunder Φ_{LS} menghasilkan tegangan e_{LS} yang diberikan oleh persamaan:

$$e_{LS}(t) = Ns \frac{d\phi_{LS}}{dt} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$\phi_{LS} = (PN_S)i_S \dots\dots\dots (2.25)$$

Karena fluks bocor banyak yang melalui udara, kontanta reluktansi udara lebih besar daripada reluktansi inti besi, maka fluks bocor primer Φ_{LP} proporsional dengan arus primer I_p dan fluks bocor sekunder Φ_{LS} —proportional dengan arus sekunder I_s . Sehingga didapatkan:

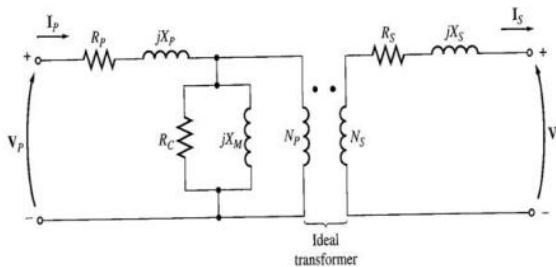
$$e_{LP}(t) = Np \frac{d}{dt} (PN_p)i_p = Np^2P \frac{di_p}{dt} = L_p \frac{di_p}{dt} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$e_{LS}(t) = N_s \frac{d}{dt} (PN_s) i_s = N_s^2 P \frac{di_p}{dt} = L_s \frac{di_s}{dt}$$

.....(2.27)

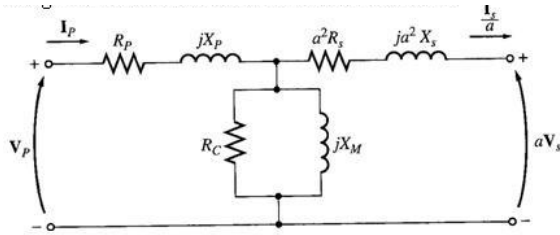
Dengan L_p induktansi diri lilitan primer dan L_s induktansi diri lilitan sekunder. Dengan demikian fluks bocor pada rangkaian ekivalen transformator akan dimodelkan sebagai induktor primer dan sekunder.

Kemudian yang terakhir adalah memodelkan pengaruh dari eksitasi inti transformator, yaitu dengan memperhitungkan arus magnetisasi I_m , rugi-rugi arus eddy, dan rugi-rugi hysteresis. Arus magnetisasi I_m adalah arus yang sebanding dengan tegangan pada inti transformator dan lagging (tertinggal) 90° dengan tegangan suplai, sehingga dapat dimodelkan sebagai reaktansi X_m yang dipasang paralel dengan sumber tegangan primer. Arus rugi inti (arus eddy dan hysteresis) merupakan arus yang sebanding dengan tegangan pada inti transformator dan satu phase dengan tegangan suplai, sehingga dapat dimodelkan dengan hambatan R_c yang dipasang paralel dengan sumber tegangan primer. Dengan demikian maka dihasilkan model untuk real transformator sebagai berikut.

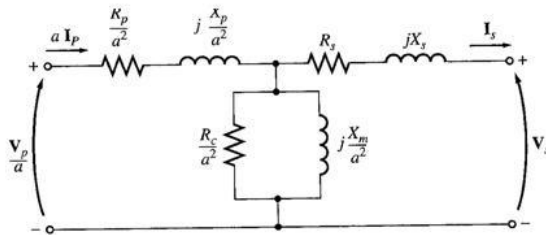


Gambar 2.8 Rangkaian ekivalensi transformator

Kemudian rangkaian ekivalen diatas dapat disederhanakan dengan melihat pada sisi primer atau pada sisi sekunder. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen transformer dilihat dari sisi primer



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen transformer dilihat dari sisi sekunder

2.1.6 Rugi-rugi transformator

Rugi-rugi pada transformator terdiri dari dua macam, yaitu:

- Rugi-rugi tanpa beban atau *no load losses* (P_{NL})
- Rugi-rugi oleh beban atau *load losses* (P_{LL})

Rugi-rugi oleh beban (P_{LL}) merupakan fungsi dari arus beban, yang terutama adalah rugi-rugi tembaga I^2R (P_R) dan *stray losses* (P_{ST}). *stray losses* adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh arus eddy yang menimbulkan fluksi elektromagnetik yang menyasar ke kumparan, inti, pelindung magnetic, dinding tangki dan sebagainya.

$$P_{loss} = P_{NL} + P_{LL} \dots \dots \dots (2.28)$$

$$P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dari uraian di atas, rugi-rugi daya pada transformator yang timbul akibat adanya komponen-komponen harmonisa pada tegangan dan arus adalah rugi-rugi tembaga, rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy.

2.1.6.1 Rugi-rugi tembaga

Komponen rugi-rugi tembaga pada transformator adalah I^2R , dimana arus (I) akan menjadi lebih besar nilainya apabila terdapat harmonisa. Begitu juga dengan nilai tahanan (R), saat terjadi distorsi harmonisa maka nilai R berubah menjadi nilai tahanan arus searah (R_{DC}) ditambah R_{AC} yang merupakan nilai tahanan tambahan akibat efek kulit (skin effect) dan efek kedekatan penghantar (proximity effect) sebagai dampak adanya frekuensi-frekuensi harmonisa.

Besar rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonisa di dalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_R = \sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 \times R_h \dots\dots\dots (2.30)$$

Dimana:

P_R = rugi-rugi tembaga

I_h = arus komponen harmonisa

R_h = tahanan untuk frekuensi harmonisa ke-h

Arus harmonisa dipengaruhi oleh fenomena yang dikenal sebagai efek kuli. Apabila frekuensi arus yang dihasilkan lebih tinggi dari frekuensi fundamentalnya (50Hz), arus cenderung mengalir pada permukaan (skin) dari kawat konduktor. Hal ini mengurangi area efektif cross sectional dari konduktor dan meningkatkan tahanannya.

Tahanan yang besar akan menyebabkan rugi-rugi tembaga sebesar I^2R yang besar pula. Pendekatan efek tersebut di atas menimbulkan aliran arus dengan distribusi yang tidak sama melalui konduktor.

2.1.6.2 Rugi-rugi histerisis

Bila luas penampang inti besi (A), panjang rangkaian magnet (l) dan jumlah lilitan (N) maka perubahan fluks yang terjadi $d\phi$. Untuk suatu perubahan waktu kecil dt adalah $d\phi/dt$, tegangan induksi (e) dinyatakan sebagai:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.31)$$

Daya sumber untuk mengimbangnya akan sama dengan: $-e.i$
 Dalam interval waktu dt , energy yang diberikan adalah:

$$dW = (-e)i = Ni \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$W = \int_{-\phi}^{+\phi} N i d\phi \dots\dots\dots (joules) \dots\dots\dots (2.33)$$

Untuk $d\phi = A.dB$ dan $Ni = H.l$, dimana B adalah kerapatan fluks (weber/m²) dan H adalah kuat medan magnet (Ampere-lilitan/m) maka persamaan diatas menjadi:

$$W = A.l \int_{-B_m}^{+B_m} H.dB \dots\dots\dots (2.34)$$

Persamaan diatas tidak dapat diturunkan karena fungsi yang tidak diketahui saling berkaitan satu sama lain, menurut percobaan yang dilakukan Charles P Steinmetz bahwa area itu besarnya sebanding dengan frekuensi dan B_m^x , nilai x untuk Fe_C adalah 1.6 sedangkan untuk Fe_Si antara 1.7-2.0, sehingga persamaan menjadi:

$$P_h = \eta . A . l . f \quad B_m^x \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana:

P_h = rugi histerisis (Watt)

η = konstanta material inti

f = frekuensi (Hz)

B_m = kerapatan fluks maksimum

2.1.6.3 Rugi-rugi arus eddy

Distorsi arus beban relative lebih tinggi menyebabkan timbulnya rugi arus eddy. Dengan arus-arus frekuensi harmonisa lebih tinggi menyebabkan bertambahnya rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi. Konsentrasi arus eddy lebih tinggi pada ujung-ujung belitan transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Bertambahnya rugi-rugi arus eddy karena harmonisa berpengaruh nyata pada temperature kerja transformator. Hal ini akan dapat terlihat pada besar rugi-rugi daya nyata (watt) akibat arus eddy ini. Besarnya rugi-rugi total arus eddy dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{EC} = P_{EC_r} \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \times h^2 \dots\dots\dots (2.36)$$

Dimana:

h = bilangan bulat orde komponen harmonisa

P_{EC_r} = rugi-rugi arus eddy (pu of rate I^2R losses)

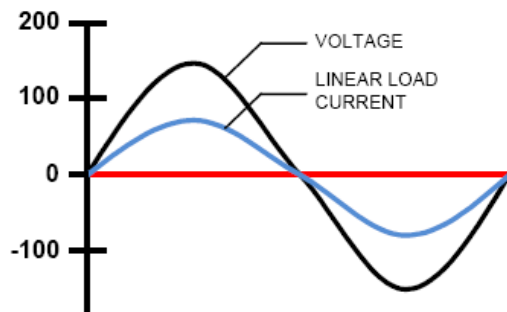
I_h = arus rms harmonisa ke- n (pu of rated load rms current)

2.2 Beban Linier dan Beban Non Linier

pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban, yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier memberikan bentuk gelombang keluaran linier yaitu arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding dengan tegangan dasar

sehingga gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya.

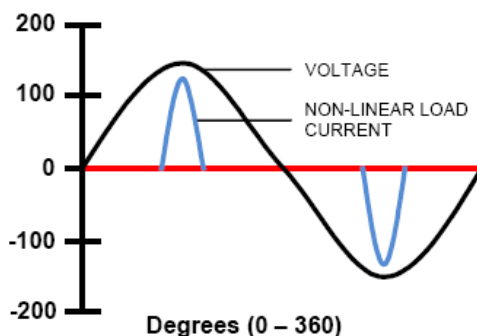
Beban linier adalah beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangannya. Terdapat hubungan yang linier antara arus dan tegangan sehingga bentuk gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangannya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.11. Beban linier menyerap arus sinusoidal bila disuplai oleh tegangan sinusoidal. Contoh beban linier antara lain motor listrik, pemanas, lampu pijar, dan lainnya.



Gambar 2.11 Gelombang beban linier

Beban non linier umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus yang tidak tetap pada setiap periode waktunya. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non linier yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang ini tidak berkaitan dengan sumber tegangannya. Beban non linier dapat dimodelkan sebagai sumber arus harmonik seperti gambar berikut.

Beban yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya, sehingga bentuk gelombang arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangannya. Tidak terdapat hubungan yang linier antara arus dan tegangan. Beban non-linier menyerap arus non sinusoidal demikian juga arus harmonik, walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Seperti Gambar 2.12 di bawah ini. Contoh beban non-linier antara lain penyearah, UPS, komputer, pengaturan kecepatan motor, lampu-lampu pelepasan, alat-alat ferromagnetik, motor DC, dan tungku busur api, dan lain-lainnya.



Gambar 2.12 Gelombang beban non linier

Sumber harmonik secara umum terdiri dari dua jenis yaitu peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan peralatan elektronika daya. Peralatan yang memiliki kondisi saturasi merupakan komponen yang bersifat magnetik misalnya transformator, mesin-mesin listrik, peralatan yang menggunakan power supply dan magnetic ballast. Peralatan elektronika daya merupakan peralatan yang menggunakan komponen-komponen elektronika daya misalnya diode, thyristor, transistor, dan lain-lain.

2.3 Harmonisa

harmonisa merupakan gangguan yang dalam distribusi tenaga listrik yang disebabkan oleh adanya distorsi gelombang arus dan tegangan yang menyebabkan adanya pembentukan gelombang-

gelombang yang tidak sinusoidal atau dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Harmonisa dapat menyebabkan cacat gelombang atau perubahan bentuk gelombang akibat adanya komponen frekuensi tambahan.

Pada sistem tenaga listrik frekuensi kerja normal adalah 50Hz atau 60Hz tetapi dalam aplikasi pemakaiannya berdasarkan beban yang digunakan frekuensi arus dan tegangan dapat menjadi tidak normal atau menjadi kelipatan dari frekuensi normal 50Hz/60Hz. Jika frekuensi adalah frekuensi normal dari suatu sistem, maka frekuensi orde n (1, 2, 3, 4, n) adalah factor kelpatan dari frekuensi normal sehingga frekuensi dapat berubah menjadi 100Hz, 150Hz dan seterusnya. Gelombang inilah yang kemudian menumpang pada gelombang normal sehingga terbentuklah gelombang tidak sinusoidal yang merupakan hasil dari penjumlahan antara gelombang normal sesaat dengan gelombang harmonisanya.

Penjumlahan gelombang-gelombang sinusoidal menjadi gelombang non-sinusoidal dapat dianalisis menggunakan deret fourier yang memperlihatkan hubungan antara fungsi waktu dengan fungsi frekuensi. dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots\dots\dots (2.37)$$

Dengan koefisien a_0, a_n, b_n masing-masing adalah:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \dots\dots\dots (2.38)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \dots\dots\dots (2.39)$$

Dimana n adalah indeks harmonisa

2.3.1 Standart Harmonisa

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{Sh}}{I_{S1}}\right)^2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

dimana :

IHD : Individual Harmonisa Distortion (%)

ISh : Arus harmonisa pada orde ke-h (A)

IS1 : Arus fundamental (Irms) dalam A

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental. Hubungan antara THD dengan IHD dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$THD = \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{I_{Sh}}{I_{S1}}\right)^2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

dimana:

THD : Total Harmonisa Distortion (%)

ISh : Arus harmonisa pada orde ke-h (A)

IS1 : Arus fundamental (Irms) dalam A

Pengaruh harmonisa total untuk tegangan dapat dihitung, dengan mengganti notasi I menjadi V. Hasil perhitungan sebaiknya tidak melebihi atau sama dengan nilai yang ditetapkan oleh standar yang berlaku. Bila hasilnya lebih maka tingkat harmonisa sistem membahayakan komponenkomponen sistem dan sebaiknya harus dipikirkan cara menguranginya.

Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonisa, limitasi untuk distorsi arus harmonisa dan limitasi untuk distorsi tegangan harmonisa. Standar yang dipakai untuk limitasi tegangan harmonisa adalah IEEE 519. Untuk standard harmonisa arus,

ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L (arus hubung singkat dibagi dengan arus beban) seperti Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Standart harmonisa arus

I_{sc}/I_{LOAD}	Orde Harmonisa (dalam%)					Total Harmonic Distortion
	<11	11-16	17-22	23-24	>35	
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

dimana:

I_{SC} : arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*)

I_{LOAD} : arus beban fundamental nominal

THD : Total Harmonic Distortion dalam %

I_{SC} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*) (Dugan, 2003: 6), I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standard harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai seperti Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Standar Harmonisa Tegangan

Maximum Distortion (dalam %)	Tegangan Sistem		
	dibawah 69kV	69-138 kV	>138 kV
Individual Harmonic	3	1.5	1
Total Harmonic	5	2.5	1.5

2.3.2 Pengaruh yang Ditimbulkan oleh Harmonisa

Tegangan dan arus harmonik dapat menimbulkan efek yang berbeda-beda pada peralatan listrik yang terhubung dengan jaringan listrik tergantung karakteristik beban tersebut. Secara umum pengaruh harmonik pada peralatan tenaga listrik berupa:

- a. Nilai arus dan tegangan rms menjadi lebih besar
- b. Nilai arus dan tegangan puncak menjadi lebih besar
- c. Frekuensi sistem turun

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi yang spesifik. Nilai rms lebih besar dapat menyebabkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor. Nilai puncak yang lebih besar dapat mengganggu kerja alat ukur sehingga sering terjadi kesalahan pembacaan hasil pengukuran. Serta frekuensi dapat mempengaruhi impedansi kabel dimana semakin tinggi frekuensi semakin sering kabel menerima tegangan puncak sehingga semakin besar tegangan jatuh yang terjadi.

Efek yang bersifat kontinu dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik, salah satunya adalah pemanasan pada transformator. Transformator sangat rentan terhadap pengaruh harmonik. Transformator dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi dan pada akhirnya mengakibatkan kerugian daya. Pengaruh utama harmonik pada transformator adalah:

1. Panas lebih yang diakibatkan oleh arus beban yang mengandung harmonik.
2. Kemungkinan resonansi parallel transformator dengan kapasitansi sistem.

Pada transformator distribusi yang mencatu daya ke beban non linier menimbulkan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonic

ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya terjadi peningkatan temperature pada kawaat netral. Sebagai dampak lanjutnya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta transformator sehingga temperaturnya akan meningkat. Peningkatan temperature ini akan menurunkan efisiensi transformator dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan kerusakan.

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan. Rugi-rugi inti karena fluks yang dibangkitkan di dalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan yang terdiri dari I^2R dan stray losses dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui transformator.

Ada pula beberapa sumber yang menjelaskan bahwa rugi-rugi transformator terdiri dari duayaitu:

1. Rugi-rugi tanpa beban atau no load loss (P_{NL})
2. Rugi-rugi oleh beban atau load rated loss (P_{LL})

Rugi-rugi oleh beban (P_{LL}) merupakan fungsi dari arus beban, terutama berupa rugi-rugi tembaga I^2R (P_R) dan stray losses (P_{ST}). Stray losses merupakan rugi-rugi yang antara lain disebabkan oleh arus eddy yang menimbulkan fluksi elektromagnetik yang menyasar ke kumparan, inti, pelindung, magnetic, didnding tangki, dan sebagainya. Untuk arus harmonisa yang besar, rugi-rugi arus eddy pada kumparan adalah yang paling dominan.

$$P_{total\ loss} = P_{NL} + P_{LL} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$P_{load\ losses} = P_{DC} + P_{TSL} \dots\dots\dots (2.43)$$

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} \dots\dots\dots (2.44)$$

- a. Efek harmonisa pada rugi-rugi dc (P_{dc})

$$P_{\Omega} = R_{dc} \times I_A^2 = R_{dc} \times \left(\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_{hrms}^2 \right) \dots\dots\dots (2.45)$$

- b. Efek harmonisa pada rugi-rugi arus eddy (P_{EC})

$$P_{EC} = P_{EC-R} \times \left(\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \times h^2 \right) watt \dots\dots\dots (2.46)$$

Dimana:

P_{EC} = rugi-rugi kumparan arus eddy

P_{EC-R} =rugi-rugi kumparan arus eddy pada kondisi rated (linier)

h = orde harmonisa

h_{\max} = orde harmonisa terbesar

I_h = arus (rms) harmonisa

I_R = arus (rms) fundamental pada kondisi rated (linier)

Factor harmonisa untuk kumparan arus eddy

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \dots\dots\dots (2.47)$$

- c. Efek harmonisa pada rugi-rugi stray (P_{OSL})

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \times \left(\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \times h^{0.8} \right) watt \dots\dots\dots (2.48)$$

Dimana:

P_{OSL} = rugi-rugi stray

P_{OSL-R} = rugi-rugi stray pada kondisi rated (linier)

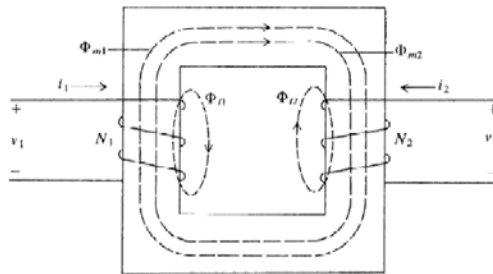
h = orde harmonisa

- h_{\max} = orde harmonisa terbesar
 I_h = arus (rms) harmonisa
 I_R = arus (rms) fundamental pada kondisi rated (linier)

Factor harmonisa untuk kumparan arus eddy

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \dots\dots\dots (2.49)$$

2.4 Pemodelan transformator



Gambar 2.13 Konstruksi dasar transformator

Pada umumnya, total fluks bocor pada kumparan primer beban linier merupakan penjumlahan dari fluks magnetisasi pada inti besi dan fluks bocor pada kumparan primer. Sedangkan pada beban non linier, terdapat rugi-rugi arus pusar (eddy current losses) pada kumparan dan rugi-rugi stray (other stray losses). Sehingga didapatkan pesamamaan total fluks yang melingkupi setiap kumparan.

$$\phi_1 = \phi_{l1} + \phi_m + \phi_{ec1} + \phi_{osl1} \dots\dots\dots (2.50)$$

$$\phi_2 = \phi_{l2} + \phi_m + \phi_{ec2} + \phi_{osl2} \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \times A} \dots\dots\dots(2.52)$$

Dimana:

R = reluctance

μ = permeabilitas

A = luas penampang

$$\phi_m = \frac{N_1 i_1 + N_2 i_2}{\mathfrak{R}_c} = \frac{N_1 i_m}{\mathfrak{R}_c} \dots\dots\dots(2.53)$$

Persamaan 2.53 merupakan fluks yang melingkupi inti. Dimana sumber tegangan menginduksi fluks bersama pada inti sehingga timbul arus magnetisasi. Arus magnetisasi yaitu arus yang diperlukan untuk membangkitkan fluks pada inti trafo.

Total fluks yang melingkupi masing-masing kumparan, yaitu:

$$\phi_1 = \phi_{l1} + \phi_m = \frac{N_1 i_1}{\mathfrak{R}_{l1}} + \frac{N_1 i_m}{\mathfrak{R}_c} \dots\dots\dots(2.54)$$

$$\phi_2 = -\phi_{l2} - \phi_m = -\frac{N_{21} i_2}{\mathfrak{R}_{l2}} - \frac{N_2 i_m}{\mathfrak{R}_c} \dots\dots\dots(2.55)$$

Persamaan tegangan: Substitusi persamaan 2.56 dan 2.57 ke

$$V_1 = R_{dc1}i_1 + V_{ec1} + V_{osl1} + \frac{N_1^2}{\Re_{l1}} \frac{di_1}{dt} + \frac{N_1^2}{\Re_c} \frac{di_m}{dt} \dots\dots\dots(2.58)$$

$$V_2 = -R_{dc2}i_2 - V_{ec2} - V_{osl2} - \frac{N_2^2}{\Re_{l2}} \frac{di_2}{dt} - \frac{N_1N_2}{\Re_c} \frac{di_m}{dt} \dots\dots\dots(2.59)$$

$$V_1 = R_{dc1}i_1 + V_{ec1} + V_{osl1} + \frac{N_1^2}{\Re_{l1}} \frac{di_1}{dt} + \frac{N_1N_2}{\Re_c} \frac{di_m}{dt} \dots\dots\dots(2.56)$$

$$V_2 = -R_{dc2}i_2 - V_{ec2} - V_{osl2} - \frac{N_2^2}{\Re_{l2}} \frac{di_2}{dt} - \frac{N_1N_2}{\Re_c} \frac{di_m}{dt} \dots\dots\dots(2.57)$$

$$V_1 = R_{dc1}i_1 + V_{ec1} + V_{osl1} + L_{l1} \frac{di_1}{dt} + e_1 \dots\dots\dots(2.61)$$

persamaan tegangan 2.58 dan 2.59:

sehingga persamaan tegangan V1 menjadi:

$$\text{dimana : } L_m \frac{di_m}{dt} = e = \text{GGL pada belitan primer}$$

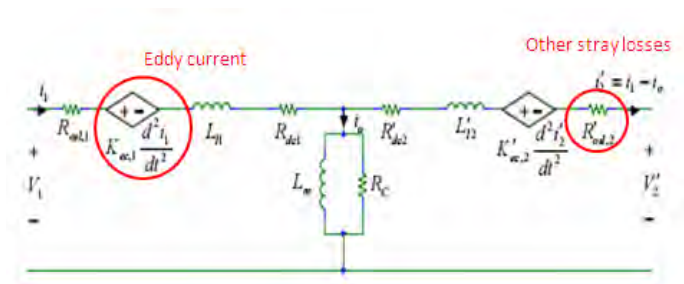
dan persamaan tegangan V2 menjadi:

$$V_2 = -R_{dc2}i_2 - V_{ec2} - V_{osl2} - L_{l2} \frac{di_2}{dt} - \frac{N_1^2N_2}{\Re_c N_1} \frac{di_m}{dt} \dots\dots\dots(2.62)$$

$$V_2 = -R_{dc2}i_2 - V_{ec2} - V_{osl2} - L_{l2} \frac{di_2}{dt} - \frac{N_2}{N_1} e_1 \dots\dots\dots(2.63)$$

$$\text{dimana : } \frac{N_2}{N_1} e_1 = \text{GGL pada belitan sekunder}$$

Dari persamaan 2.61 dan 2.63 mengenai tegangan total, rangkaian ekivalen transformator dapat dimodelkan seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Model rangkaian ekivalen transformator

Dari gambar diatas persamaan transformator *eddy current of winding* dalam bentuk perunit menjadi:

$$i_{ec}(pu) = \frac{d^2 i / dt^2}{|d^2 i_R / dt^2|} = \frac{d^2 i}{dt^2} \times \frac{1}{I_{R-P} \omega_1^2} \dots\dots\dots (2.64)$$

$$v_{ec,1} = i_{ec,1}(pu) I_{R-P,1} \times R_{ec-R,1}$$

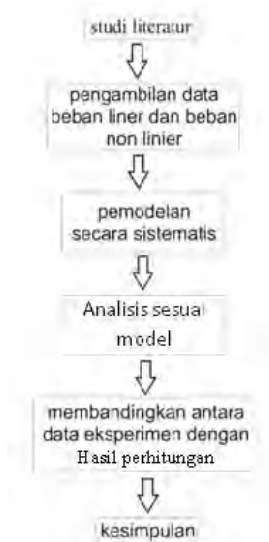
$$v_{ec,1}(pu) = \frac{I_{R-P,1} \times R_{ec-R,1}}{I_{R-P,1} \omega_1^2} \times \frac{d^2 i_1}{dt^2} \dots\dots\dots (2.65)$$

$$v_{ec,1}(pu) = k_{ec,1} \times \frac{d^2 i_1}{dt^2}$$

BAB III

KARAKTERISTIK BEBAN LINIER DAN BEBAN NON LINIER

3.1 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.1 Blok diagram tahap pelaksanaan Tugas Akhir

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa pemodelan transformator beban non linier dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu: melakukan eksperimen dengan beberapa pengukuran. Kemudian disusun dimodelkan secara sistematis sebagai input pada program simulink.

3.2 Eksperimen

Eksperimen merupakan tahap awal sebelum dilakukan pemodelan transformator. Pada tahap ini dilakukan berbagai pengukuran, yaitu:

- a. Pengujian / tes hubung terbuka (open cicuit test)

- b. Pengujian / tes hubung singkat (short circuit test)
- c. Pengujian transformator berbeban
- d. Pengujian tahanan kumparan
- e. Pengukuran arus harmonisa pada beban non linier.

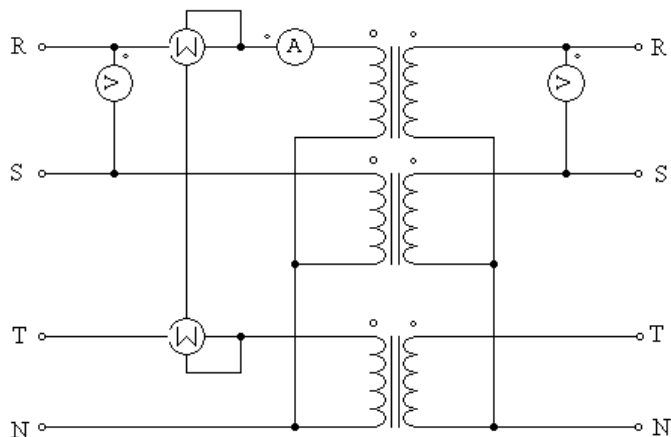
Hal-hal yang perlu diperhatikan pada saat eksperimen adalah alat dan bahan. Dalam pengujian diperlukan:

- | | |
|--|----------------|
| 1. Transformator 1 fasa 100VA | (1 buah) |
| 2. Amperemeter | (2 buah) |
| 3. Voltmeter | (2 buah) |
| 4. Wattmeter | (2 buah) |
| 5. Power analyzer | (1 buah) |
| 6. Kabel penghubung | (secukupnya) |
| 7. Sumber tegangan AC | (1 buah) |
| 8. Beban linier (lampu pijar) 25watt | (4 buah) |
| 9. Beban non linier (lampu CFL) 25watt | (4 buah) |
| 10. Osiloskop | (1 buah) |
| 11. Clamp ampere 5A | (2 buah) |

3.2.1 Pengujian / tes hubung terbuka (open circuit test)

Pengukuran hubung terbuka juga biasa disebut dengan pengukuran rugi besi dan arus beban nol atau pengukuran tanpa beban. Pengukuran hubung terbuka ini dilakukan untuk mengetahui jumlah daya yang hilang akibat rugi histerisis dan eddy current dari inti besi (core), mengetahui besarnya arus yang ditimbulkan oleh rugi-rugi tersebut, dan dapat mengukur nilai R_c dan X_m .

Pengukuran tes hubung terbuka dilakukan dengan memberikan tegangan nominal dari sumber tegangan AC pada sisi primer transformator dengan meletakkan alat ukur pada sisi primer sedangkan bagian sisi sekunder dibiarkan terbuka.



Gambar 3.2 Rangkaian tes hubung terbuka (open circuit)

Tabel 3.1 Pengujian open circuit

Tegangan Primer (volt)	Tegangan Sekunder (volt)	Arus Primer (Ampere)	Arus Sekunder (Ampere)	Daya Primer (Watt)	Daya Sekunder (Watt)
220	219	0.04815	-	6.15	-

Tabel 3.1 merupakan hasil dari pengujian open circuit / hubung terbuka transformator. Pada pengujian tersebut dilakukan tanpa beban dibiarkan terbuka di sisi sekunder transformator, sehingga didapatkan nilai tegangan primer, tegangan sekunder, arus primer dan daya primer. Berdasarkan parameter pengujian akan didapatkan nilai R_c dan X_m . Perhitungan dapat dilihat sebagai berikut:

Perhitungan Open Circuit

Diketahui:

Poc = 6.15 watt ; Voc = 220V ; Ioc = 0.04815A

$$\cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} = \frac{6.15}{220 \times 0.04815} = 0.5806$$

$$\theta = 54.51^\circ$$

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\theta = \frac{0.04815}{220} \angle -54.51 = 0.0002189 \angle -54.51$$

$$Y_E = 0.00012708 - j0.00017823$$

$$\frac{1}{R_c} = 0.00012708$$

$$R_{c_c} = 7869.05 \Omega$$

$$\frac{1}{X_m} = 0.00017823$$

$$X_m = 5610.72 \Omega$$

Sehingga nilai L_m didapatkan sebesar:

$$X_m = 2 \times \pi \times f \times L_m$$

$$5610.72 = 2 \times \pi \times 50 \times L_m$$

$$L_m = 17.87 H$$

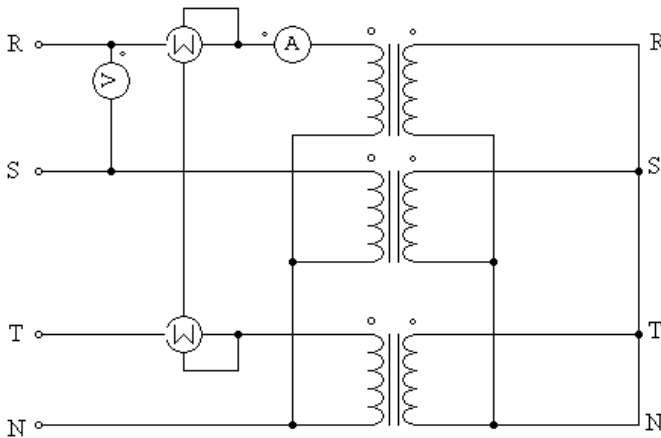
3.2.2 Pengujian / tes hubung singkat (short circuit test)

Pengukuran hubung singkat ini dilakukan untuk mengetahui jumlah daya yang hilang ketika transformator beroperasi akibat dari rugi tembaga dan rugi stray (stray losses), dan dapat mengukur nilai parameter trafo impedansi ekuivalen yaitu $R_{ekivalen}$ dan $X_{ekivalen}$.

Pengukuran tes hubung singkat dilakukan dengan memberikan arus nominal dari sumber tegangan AC pada sisi primer transformator sedangkan bagian sisi sekunder dihubungkan singkat. Dengan begitu pada sisi sekunder juga akan muncul arus sebesar arus nominal atau tidak lebih besar dari arus nominal (mendekati arus nominal).

Arus pada sisi primer diatur hingga arus nominal. Berikut penentuan arus nominal:

$$I = \frac{S}{V} = \frac{100}{220} = 0.45 A$$



Gambar 3.3 Rangkaian tes hubung singkat (short circuit)

Tabel 3.2 Pengujian short circuit

Tegangan Primer (volt)	Tegangan Sekunder (volt)	Arus Primer (Ampere)	Arus Sekunder (Ampere)	Daya Primer (Watt)	Daya Sekunder (Watt)
16.7	-	0.457	0.455	7.05	-

Tabel 3.2 merupakan hasil dari pengujian open circuit / hubung terbuka transformator. Pada pengujian tersebut dilakukan tanpa beban dihubungkan antara fasa dengan netral di sisi sekunder transformator, sehingga didapatkan nilai tegangan primer,, arus primer, arus sekunder dan daya primer. Berdasarkan parameter pengujian akan didapatkan nilai Req dan Xeq. Perhitungan dapat dilihat sebagai berikut:

Perhitungan Short Circuit

Diketahui:

P_{sc} = 7.05 watt ; V_{sc} = 16.7V ; I_{sc} = 0.45

$$\cos \theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc}} = \frac{7.05}{16.7 \times 0.457} = 0.923$$

$$\theta = 22.5^\circ$$

$$Z_E = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta = \frac{16.7}{0.457} \angle 22.5 = 36.5 \angle 22.5 = 33.7585 + j13.98$$

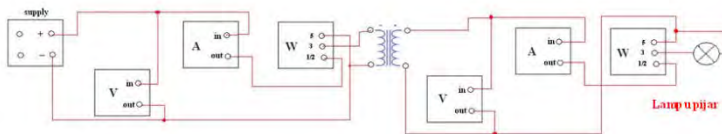
$$R_{eqp} = 33.76\Omega$$

$$X_{eqp} = 13.98\Omega$$

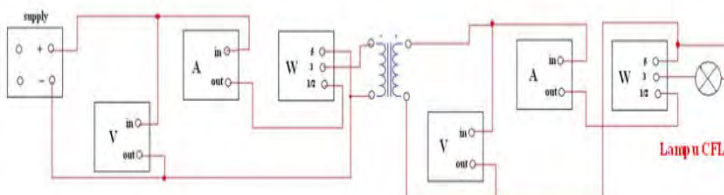
3.2.3 Pengukuran transformator berbeban

Pengukuran transformator berbeban dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik suatu transformator dan mengetahui rugi-rugi pada suatu transformator. Pada pengukuran, transformator diberi suplai tegangan sebesar 220 volt.

Pengukuran berbeban akan diuji dengan menggunakan beban linier dan beban non linier. Pada pengujian dengan beban linier, lampu pijar digunakan sebagai bebannya. Pengujian dilakukan secara berulang dengan beban yang berbeda yaitu: lampu pijar 25watt, lampu pijar 50watt, lampu pijar 75watt dan lampu pijar 100watt. Begitu pula pada pengujian beban non linier, juga akan dilakukan hal yang sama. Namun beban yang dipergunakan merupakan lampu CFL. Gambar rangkaian pengukuran transformator berbeban dapat di lihat pada Gambar 3.4 dan 3.5.



Gambar 3.4 Rangkaian pengujian transformator berbeban
(beban linier)

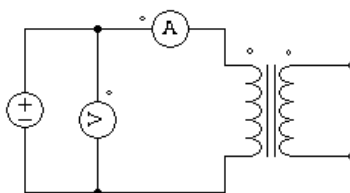


Gambar 3.5 Rangkaian pengujian transformator berbeban (beban non linier)

3.2.4 Pengujian tahanan kumparan

Pengujian tahanan kumparan merupakan pengujian DC test. Tujuan dilakukannya pengujian tersebut adalah untuk mengetahui nilai tahanan awal/ tahanan DC (R_{dc}) transformator.

Pengujian dilakukan dengan memberikan suplai DC pada salah satu sisi transformator. Ketika memberikan suplai DC perlu diperhatikan arus yang terukur, arus tidak boleh melbihi rating arus transformator. Untuk hasil pengujian tahanan (R_{dc}) dapat dilihat pada tabel 3.3 dan 3.4.



Gambar 3.6 Rangkaian pengujian tahanan kumparan

Tabel 3.3 Pengujian tahanan awal (R_{dc}) sisi input transformator

Arus (Ampere)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45
Tegangan (Volt)	1.65	3.2	4.65	6.2	6.9
Hambatan (Ohm)	16.5	16	15.5	15.5	15.3

$$R(rata - rata) = \frac{16.5 + 16 + 15.5 + 15.5 + 15.3}{5} = 15.76 \text{ Ohm}$$

Tabel 3.4 Pengujian tahanan awal (Rdc) sisi output transformator

Arus (Ampere)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.45
Tegangan (Volt)	1.95	3.1	5.45	7.2	8
Hambatan (Ohm)	19.5	15.5	18.167	18	17.78

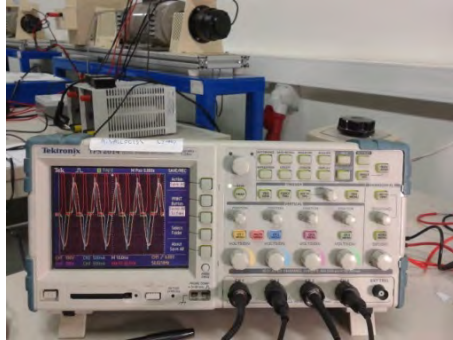
$$R(rata - rata) = \frac{19.5 + 15.5 + 18.167 + 18 + 17.78}{5} = 17.79 \text{ Ohm}$$

3.2.5 Pengukuran arus harmonisa

Pengukuran arus harmonisa dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai arus pada harmonisa ganjil. Pengukuran harmonisa juga dilakukan pada kedua sisi transformator, yaitu: sisi primer dan sisi sekunder transformator. Alat ukur yang digunakan bisa menggunakan power quality analyzer atau menggunakan osiloskop. Penggunaan kedua alat ukur tersebut tergantung pada beban yang dilayani dan kapasitas transformator.



Gambar 3.7 Alat Ukur Power Quality Analyzer



Gambar 3.8 Alat Ukur Osiloskop

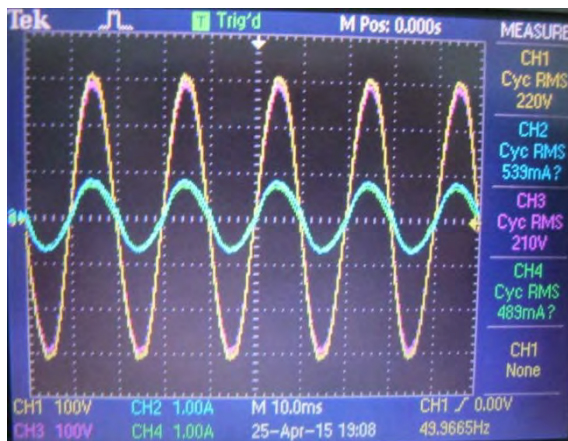
3.3 Karakteristik beban linier dan non linier

Karakteristik yang dipergunakan dalam penelitian berupa data gelombang arus, tegangan, dan daya. Untuk nilai data dapat dilihat pada gambar 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 dan 3.14

3.3.1 Beban linier

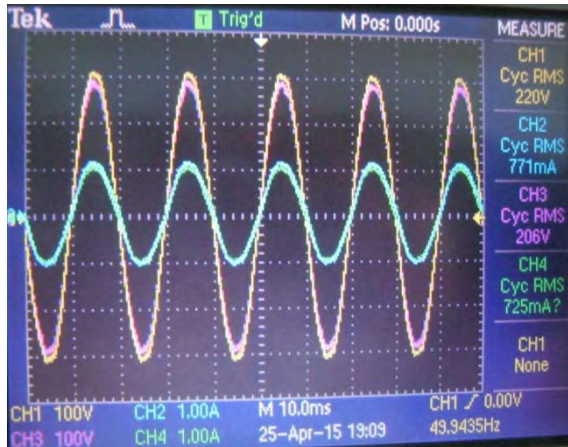
a. Bentuk gelombang

- Beban 50watt



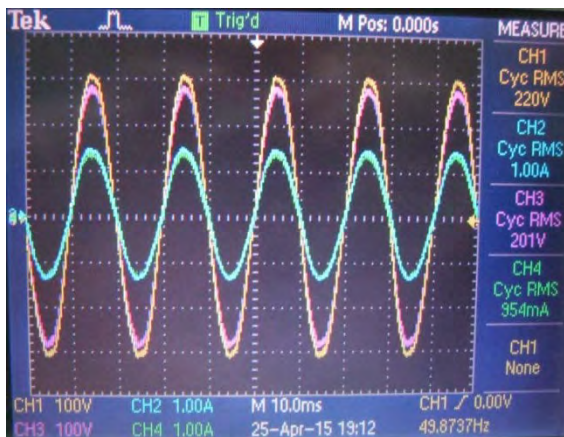
Gambar 3.9 Gelombang arus dan tegangan beban 50watt

- Beban 75watt



Gambar 3.10 Gelombang arus dan tegangan beban 75watt

- Beban 100watt

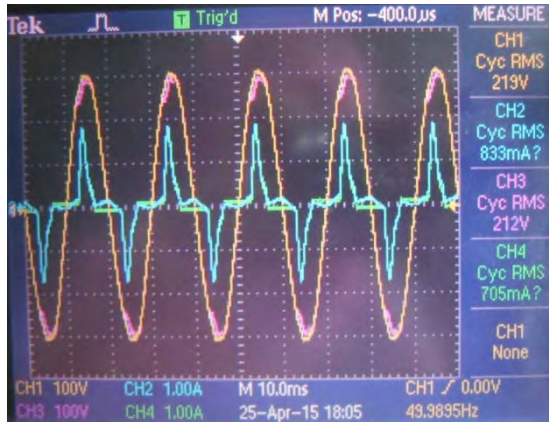


Gambar 3.11 Gelombang arus dan tegangan beban 100watt

3.3.2 Beban non linier

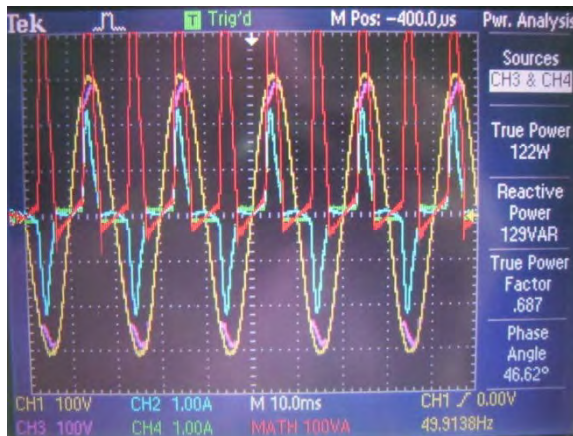
a. Bentuk gelombang

- Beban 50watt



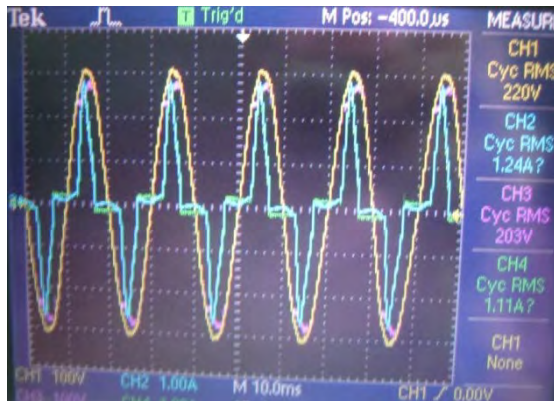
Gambar 3.12 Gelombang arus dan tegangan beban 50watt

- Beban 75watt



Gambar 3.13 Gelombang arus, tegangan dan daya beban 75watt

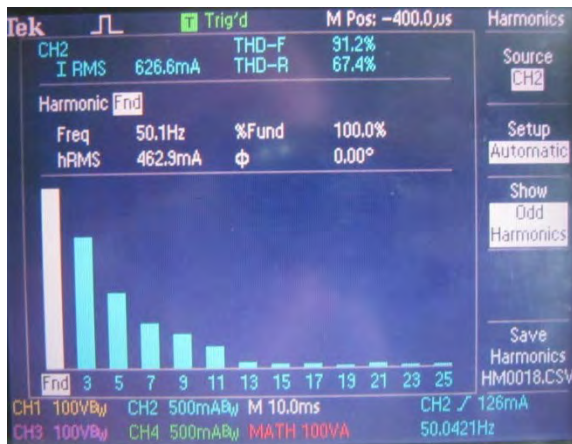
- Beban 100watt



Gambar 3.14 Gelombang arus dan tegangan beban 100watt

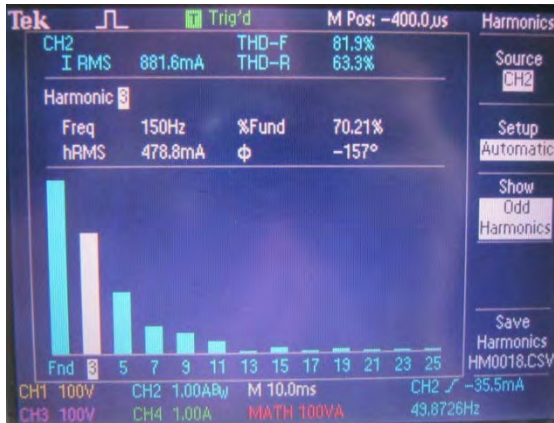
b. Spektrum

- Beban 50watt



Gambar 3.15 Spektrum arus harmonisa beban 50watt

- Beban 75watt



Gambar 3.16 Spektrum arus harmonisa beban 75watt

- Beban 100watt



Gambar 3.17 Spektrum arus harmonisa beban 100watt

Berdasarkan spektrum arus harmonisa pada gambar 3.15, gambar 3.16 dan gambar 3.17 didapatkan nilai masing-masing arus (rms) harmonisa. Nilai dapat dilihat pada tabel 3.5, tabel 3.6 dan tabel 3.7

Tabel 3.5 Pengujian arus harmonisa ganjil di sisi primer transformator

beban (watt)	arus H1 (ampere)	arus H3 (ampere)	arus H5 (ampere)	arus H7 (ampere)	arus H9 (ampere)
25	0.128	0.09195	0.05085	0.040135	0.035605
50	0.23145	0.16995	0.09755	0.0594	0.044255
75	0.34145	0.2394	0.12235	0.05585	0.04338
100	0.45605	0.3058	0.13395	0.048305	0.04525
beban (watt)	arus H11 (ampere)	arus H13 (ampere)	arus H15 (ampere)	arus H17 (ampere)	arus H19 (ampere)
25	0.02307	0.00968	0.007755	0.006245	0.003039
50	0.02676	0.00702	0.005615	0.00558	0.001124
75	0.022935	0.002178	0.009015	0.001697	0.00532
100	0.019835	0.008755	0.01139	0.003461	0.007935

Tabel 3.6 Pengujian arus harmonisa ganjil di sisi sekunder transformator

beban (watt)	arus H1 (ampere)	arus H3 (ampere)	arus H5 (ampere)	arus H7 (ampere)	arus H9 (ampere)
25	0.1084	0.0832	0.0546	0.040385	0.034175
50	0.21485	0.16425	0.099	0.05675	0.041945
75	0.32065	0.23745	0.1259	0.0565	0.04218
100	0.43155	0.3035	0.1355	0.017305	0.045715
beban (watt)	arus H11 (ampere)	arus H13 (ampere)	arus H15 (ampere)	arus H17 (ampere)	arus H19 (ampere)
25	0.02217	0.01018	0.0072	0.005605	0.002425
50	0.025015	0.0065	0.00568	0.004913	0.001024
75	0.02203	0.001804	0.008785	0.002606	0.005585
100	0.01834	0.009505	0.010655	0.00307	0.009125

Tabel 3.7 Nilai magnitude (I_h/I_1) arus harmonisa ke-n (ganjil)

magnitude (I_h/I_1)	beban	arus H1	arus H5	arus H7	arus H11
	(watt)	(ampere)	(ampere)	(ampere)	(ampere)
magnitude (I_h/I_1)	25	1	0.50369	0.372555	0.20452
	50	1	0.460787	0.264138	0.11643
	75	1	0.392639	0.176205	0.068704
	100	1	0.313984	0.0401	0.042498
magnitude (I_h/I_1)	beban	arus H13	arus H17	arus H19	
	(watt)	(ampere)	(ampere)	(ampere)	
magnitude (I_h/I_1)	25	0.09391	0.051707	0.022371	
	50	0.030254	0.022867	0.004766	
	75	0.005626	0.008127	0.017417	
	100	0.022025	0.007114	0.021145	

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISIS

Seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya, untuk memodelkan suatu transformator perlu dilakukan berbagai macam pengujian, antara lain: pengujian *open circuit*, *short circuit*, pengujian kumparan dengan *DC test* dan pengujian berbeban. Pengujian berbeban yang dilakukan berupa beban linier dan beban non linier. Berikut merupakan analisis antara kedua beban.

4.1 Transformator dengan beban linier

4.1.1 Perhitungan

Nilai P_{dc} apabila transformator diberi beban linier dapat dilihat sebagai berikut.

$$P_{dc} = (R_p \times I_p^2) + (R_s \times I_s^2)$$

Untuk beban lampu CFL 25watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.021255) + (17.79 \times 0.016996) = 0.637338$$

Untuk beban lampu CFL 50watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.06741) + (17.79 \times 0.059876) = 2.127576$$

Untuk beban lampu CFL 75watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.135238) + (17.79 \times 0.122385) = 4.30858$$

Untuk beban lampu CFL 100watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.228802) + (17.79 \times 0.205412) = 7.260148$$

4.1.2 Eksperimen

Tabel 4.1 merupakan hasil pengujian transformator berbeban dengan beban linier berupa lampu pijar. Dari hasil pengukuran di sisi input dan sisi output transformator dapat dilihat efisiensinya. Semakin besar beban yang dipasang, semakin besar pula efisiensinya. Namun bila beban yang dipasang sebesar kapasitas transformator yaitu 100VA maka efisiensinya akan turun karena arus primer yang terukur melebihi rating transformator.

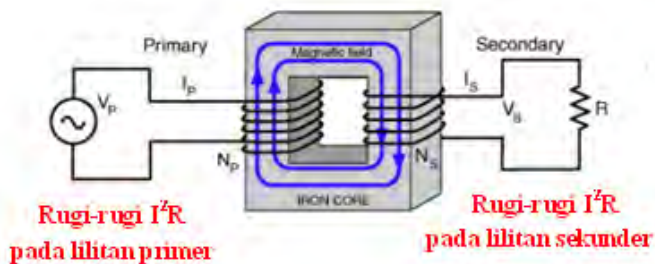
Tabel 4.1 Pengujian transformator dengan beban linier

input	Beban			
	25 watt	50 watt	75 watt	100 watt
Tegangan (volt)	219	220	220	219
Arus (ampere)	0.153	0.2695	0.3855	0.4995
Daya (watt)	32.6	59	84.5	109.5
output	Beban			
	25 watt	50 watt	75 watt	100 watt
Tegangan (volt)	213	210	206	201
Arus (ampere)	0.1215	0.2445	0.3625	0.4775
Daya (watt)	25.7	51	74	95.5
Efisiensi (%)	78.83	86.44	87.57	87.21

4.2 Transformator dengan beban non linier

4.2.1 Perhitungan berdasarkan pemodelan transformator

Pada transformator, bila nilai komponen harmonisa atau arus harmonisa meningkat berarti juga akan terjadi kenaikan rugi-rugi daya pada transformator akibat beban, yaitu rugi-rugi tembaga.



Gambar 4.1 Prinsip rugi-rugi transformator

Rugi-rugi tembaga pada awalnya hanya bernilai:

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2$$

$$P_{dc} = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times I_2^2$$

namun akibat adanya efek harmonisa akan menjadi sebesar:

$$P_{dc} = R_{dc} \times I_A^2 = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_{h,rms}^2$$

Berikut merupakan penjabaran perhitungan rugi-rugi:

- a. Hitung $\sum_{h=1}^{h=19} I_{h,rms}^2$ untuk input transformator

Tabel 4.2 Jumlah keseluruhan nilai harmonisa di sisi input

Beban (watt)	$\sum_{h=1}^{h=19} I_{h,rms}^2$
25	0.021255
50	0.06471
75	0.135238
100	0.228802

- b. Hitung $\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_{h,rms}^2$ untuk output transformator

Tabel 4.3 Jumlah keseluruhan nilai harmonisa di sisi output

Beban (watt)	$\sum_{h=1}^{h=19} I_{h,rms}^2$
25	0.016996
50	0.059876
75	0.122385
100	0.205412

c. Nilai P_{dc} apabila transformator diberi beban non linier

$$P_{dc} = R_{dc} \times \sum_{h=1}^{h \max} I_{h,rms}^2 = \left(R_{dc_p} \times \sum_{h=1}^{h \max} I_{h,rms,p}^2 \right) + \left(R_{dc_s} \times \sum_{h=1}^{h \max} I_{h,rms,s}^2 \right)$$

Untuk beban lampu CFL 25watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.021255) + (17.79 \times 0.016996) = 0.637338$$

Untuk beban lampu CFL 50watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.06741) + (17.79 \times 0.059876) = 2.127576$$

Untuk beban lampu CFL 75watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.135238) + (17.79 \times 0.122385) = 4.30858$$

Untuk beban lampu CFL 100watt

$$P_{dc} = (15.76 \times 0.228802) + (17.79 \times 0.205412) = 7.260148$$

d. Perhitungan factor harmonic eddy current losses dan factor harmonic other stray losses

Tabel 4.4 Factor harmonic eddy current losses

Beban (watt)	$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=19} \left[\frac{Ih}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=19} \left[\frac{Ih}{I} \right]^2}$
25	14.97
50	9.01
75	5.95
100	3.65

Tabel 4.5 Factor harmonic other stray losses

Beban (watt)	$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=19} \left[\frac{Ih}{I1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=19} \left[\frac{Ih}{I1} \right]^2}$
25	2.05
50	1.68
75	1.46
100	1.26

e. Perhitungan rugi-rugi eddy current dan stray losses

$$P(\text{total stray losses}) = P_{sc} - P_{dc}$$

$$P(\text{winding eddy current}) = 0.33 \times P(\text{total stray losses})$$

$$P(\text{other stray losses}) = P(\text{total stray losses}) - P(\text{winding eddy current})$$

Tabel 4.6 Rugi-rugi pada beban 25watt

tipe rugi-rugi	rugi-rugi (linier) (watt)	rugi-rugi (non linier) (watt)	faktor rugi-rugi harmonisa	corrected losses under harmonic (watt)
no load	6.15	6.15		6.15
dc	0.631546	0.637338		0.64
winding eddy current	2.1186	2.1153	14.97	31.67
other stray	4.301	4.295	2.05	8.8
Total	13.2	13.202		47.26

Tabel 4.7 Rugi-rugi pada beban 50watt

tipe rugi-rugi	rugi-rugi (linier) (watt)	rugi-rugi (non linier) (watt)	faktor rugi-rugi harmonisa	corrected losses under harmonic (watt)
no load	6.15	6.15		6.15
dc	2.20814	2.127576		2.127576
winding eddy current	1.597	1.624	9.01	14.63
other stray	3.24	3.298	1.68	5.54
Total	13.195	13.199		28.45

Tabel 4.8 Rugi-rugi pada beban 75watt

tipe rugi-rugi	linier (watt)	non linier (watt)	faktor harmonisa	corrected losses (watt)
no load	6.15	6.15		6.15
dc	4.6798	4.3085		4.30858
winding eddy current	0.782	0.904	5.95	5.38
other stray	1.59	1.84	1.46	2.69
Total	13.201	13.202		18.53

Tabel 4.9 Rugi-rugi pada beban 100watt

tipe rugi-rugi	rugi-rugi (linier) (watt)	rugi-rugi (non linier) (watt)	faktor rugi-rugi harmonisa	corrected losses under harmonic (watt)
no load	6.15	6.15		6.15
Dc	7.98835	7.260148		7.260148
winding eddy current	0.31	0.0693	3.65	0.25
other stray	0.63	0.14	1.26	0.18
Total	15.08	13.62		13.84

Hasil rugi-rugi pada transformator pada masing-masing beban yang berbeda dapat dilihat pada tabel 4.6, tabel 4.7, tabel 4.8 dan tabel 4.9.

Berdasarkan perhitungan sesuai pemodelan transformator, efisiensi daya trafo dengan beban linier 25watt sebesar 86.8%, efisiensi daya trafo dengan beban linier 50watt sebesar 86.805%, efisiensi daya trafo dengan beban linier 75watt sebesar 86.799%, efisiensi daya trafo dengan beban linier 100watt sebesar 84.92%. Sedangkan efisiensi daya trafo dengan beban non linier 25watt sebesar 52.74%, efisiensi daya trafo dengan beban non linier 50watt sebesar 71.55%, efisiensi daya trafo dengan beban non linier 75watt sebesar 81.47%, efisiensi daya trafo dengan beban non linier 100watt sebesar 86.16%.

4.2.2 Eksperimen

Tabel 4.10 merupakan hasil pengujian transformator berbeban dengan beban non linier berupa lampu CFL. Dari hasil pengukuran di sisi input dan sisi output transformator dapat dilihat efisiensinya. Semakin besar beban yang dipasang, semakin besar pula efisiensinya. Namun bila beban yang dipasang sebesar kapasitas transformator yaitu 100VA maka efisiensinya akan turun karena arus primer yang terukur melebihi rating transformator.

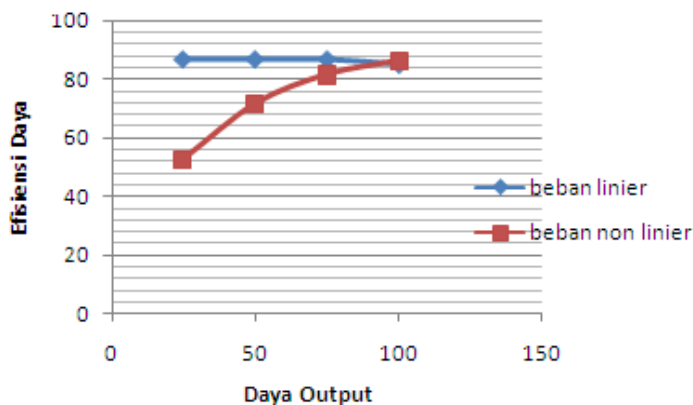
Tabel 4.10 Pengujian transformator dengan beban non linier

input	Beban			
	25 watt	50 watt	75 watt	100 watt
Tegangan (volt)	220	220	220	220
Arus (ampere)	0.1785	0.4215	0.4425	0.625
Daya (watt)	27.8	50.5	75.5	98
output	Beban			
	25 watt	50 watt	75 watt	100 watt
Tegangan (volt)	215	213	209	203
Arus (ampere)	0.1595	0.3015	0.4225	0.565
Daya (watt)	20.85	40.85	64	80.5
Efisiensi (%)	75	80.89	84.77	82.14

4.3 Derating transformator

4.3.1 Perhitungan

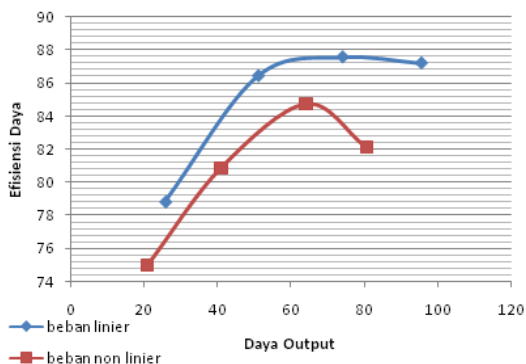
Berdasarkan kurva perbandingan gambar 4.2, efisiensi beban linier cenderung lebih stabil namun ketika dibebani beban penuh terjadi penurunan akibat adanya arus berlebih. Jika dibandingkan beban non linier beban non linier yang cenderung naik grafiknya.



Gambar 4.2 Kurva perbandingan beban linier dengan beban non linier berdasarkan perhitungan.

4.3.2 Eksperimen

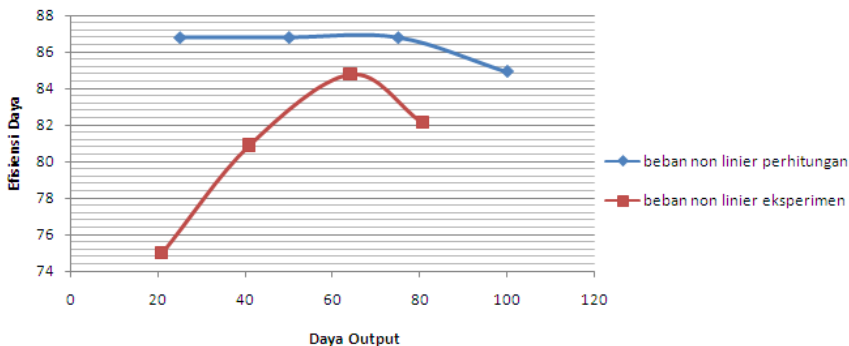
Berdasarkan kurva perbandingan gambar 4.3, efisiensi beban linier lebih tinggi dibandingkan beban non linier. Hal tersebut dipengaruhi akibat lampu pijar yang bersifat resistif sedangkan lampu CFL mengandung komponen elektronika yang menimbulkan harmonisa.



Gambar 4.3 Kurva perbandingan beban linier dengan beban non linier berdasarkan eksperimen.

4.3.3 Analisis perbandingan

Beberapa pengukuran yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan rugi-rugi daya transformator yang terjadi ketika transformator melayani beban linier dengan ketika transformator melayani beban non linier. Tingkat pembebanan antara beban linier dengan beban non linier pun dirancang sama. Ketika pembebanan transformator sebesar 100% tidak disarankan untuk menghindari arus berlebih pada sisi primer transformator. Akibat arus lebih dapat dilihat pada gambar 4.4 terjadi penurunan grafik. Pada hasil pengujian pun telah ditunjukkan yaitu ketika transformator melayani beban linier, arus input terukur sebesar 0.499A dan ketika transformator melayani beban non linier, arus input terukur sebesar 0.625A. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ketika pembebanan 100%, arus yang terukur melebihi rating arus transformator sebesar 0.45A.



Gambar 4.4 Kurva perbandingan antara hasil perhitungan dengan eksperimen.

Berdasarkan pengukuran dan perhitungan, rugi-rugi daya non linier lebih besar dibandingkan dengan beban linier. Hal tersebut terjadi akibat adanya pengaruh komponen harmonisa. Rugi-

rugi daya yang terdapat pada transformator ketika bekerja melayani beban terdiri dari rugi-rugi inti / *no load losses* (P_{nl}), rugi-rugi tembaga (P_{dc}), rugi-rugi *winding eddy current* (P_{ec}), dan rugi-rugi other stray (P_{osl}). Perbedaan atau kenaikan antara rugi-rugi transformator ketika melayani beban non linier dan beban linier tidak terlalu signifikan, hanya 0.1%.

Dari hasil pengukuran dan perhitungan berdasarkan model transformator, didapatkan perbedaan efisiensi. Perbedaan efisiensi antara keduanya sekitar 5.5%. Hal tersebut ditunjukkan sebagai berikut: nilai perhitungan pada beban 50watt sebesar 71.55% sedangkan nilai eksperimen pada beban 50watt sebesar 80.89%, nilai perhitungan pada beban 75watt sebesar 81.47% sedangkan nilai eksperimen pada beban 75watt sebesar 84.77% dan nilai perhitungan pada beban 100watt sebesar 86.16% sedangkan nilai eksperimen pada beban 100watt sebesar 82.14%.

Evaluasi rugi-rugi atau kapasitas transformator pun dapat dihitung/diketahui. Berikut adalah perhitungan kapasitas transformator dengan beban non linier.

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{LL_R}}{1 + [F_{HL} \times P_{ec_R}] + [F_{HL_str} \times P_{osl_R}]}}$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{4.308 + 0.904 + 1.84}{1 + 5.379 + 2.686}} = 0.882$$

Sehingga kapasitas transformator = $100 \times 0.882 = 88.2\text{VA}$

Dapat disimpulkan bahwa transformator 100VA mengalami derating trafo atau penurunan kapasitas transformator menjadi 88.2VA

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan hasil analisis perhitungan berdasarkan pemodelan transformator yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Tujuan pemodelan suatu transformator adalah untuk mengetahui rugi-rugi ketika transformator dibebani oleh beban non linier.
2. Pembeban transformator secara penuh (*full load*) sangat tidak disarankan untuk menghindari arus berlebih. Berdasarkan eksperimen, arus input pada beban linier terukur 0.499A dan arus input pada beban non linier terukur 0.625A. Hal tersebut menunjukkan bahwa arus tersebut melebihi rating arus transformator 0.45A.
3. Rugi-rugi daya beban non linier lebih besar daripada rugi-rugi daya beban linier, yaitu 13.021watt untuk beban linier dan 18.53watt untuk beban non linier. Hal tersebut dipengaruhi oleh adanya komponen harmonisa.
4. Berdasarkan hasil eksperimen dan perhitungan berdasarkan model transformator, didapatkan perbedaan efisiensi sekitar 5.5%.
5. Evaluasi rugi-rugi atau kapasitas transformator sebesar 88.2VA. Tidak sesuai dengan rating transformator 100VA. Dengan kata lain, mengalami derating trafo yaitu penurunan kapasitas transformator.

5.2 Saran

Dalam pembuatan dan perencanaan Tugas Akhir, penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu diharapkan agar Tugas Akhir ini dapat dikembangkan sesuai dengan perkembangan dan kemajuan ilmu

pengetahuan dan teknologi. Perbaikan lebih lanjut dapat dilakukan dengan cara :

1. Pemilihan kapasitas transformator yang lebih besar sehingga dapat melayani beban dengan kapasitas besar.
2. Pemilihan alat ukur yang tepat sesuai kapasitas beban dan transformator sehingga mendapat hasil eksperimen yang akurat dan dapat dianalisis secara detail.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Fitri, *“Analisa Pengaruh Harmonisa Terhadap Transformator Distribusi Tegangan Menengah 20kV (Studi Kasus: Transformator Distribusi PT.PLN (PERSERO) AREA JARINGAN SURABAYA BARAT)”*, Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2009.
- [2]. Juniarti, Nurlaily, *“Studi analisa tentang penyebab timbulnya harmonisa tinggi pada trafo distribusi dan cara mengatasinya”*, Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 1995.
- [3]. Sulistyowati, *“Pengaruh Efek Harmonisa Terhadap Rugi-Rugi Transformator Distribusi”*, Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, 2009.
- [4]. Reetima Mary Sah, JyotiSrivastava, *“Modelling And Simulation Of Distribution Transformer For Analysing The Transformer Losses Using Analytical And Simulation Method”*, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013.
- [5]. S.B.Sadati, A.Tahani, M.Jafari, M.Dargahi, *“Derating of transformers under Non-sinusoidal Loads”*, Proc. of the 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM 2008, Brasov, Romania

Halaman ini sengaja dikosongkan